Sismotectonique et socle tardi-hercynien réactivé au Sud-Est de la France .

Jean-Pierre Fourno[1] et Philippe Dussouillez[2]

Mots clés.- Sismo-tectonique, Mécanismes au foyer, Failles actives, Modèle géodynamique, Hercynien, Sud-est de la France.

Résumé.- Un réseau pré-fracturé tardi-hercynien entre Pelvoux et Argentera, masqué par la couverture méso-cénozoïque du socle provençal, est mis en évidence par l'exploitation d'une base de données de 8018 événements sur la sismicité provençale et ouest alpine et l'étude des mécanismes au foyer des séismes localisés dans le socle. Il s'articule dans le prolongement de la faille de la Durance en direction de Barcelonnette où il vient buter sur la faille Serenne-Argentera. Ce réseau constitué de failles décrochantes en échelon, sénestres au nord-est et au centre avec une composante inverse plus marquée vers le sud-ouest au front de la nappe de Digne, est globalement orienté N40° à N50° . L'extrusion latérale d'un bloc de socle, limité au nord par la faille dextre Belledonne-Mt-Blanc et au sud par le réseau de failles décrochantes sénestres Château-Arnoux-Barcelonnette, s'intègre dans un système de décrochements dextres généralisés, qui suit la forme arquée de la bordure externe occidentale de la chaîne alpine. Il s'accorde au modèle géodynamique des Alpes proposé actuellement et caractérisé par un régime post-collisionnel lié à l'arrêt de la convergence Apulie/Europe, et à une probable rotation antihoraire de la plaque Adriatique. Enfin, l'extrusion latérale de ce bloc a pu jouer un rôle dans les ondulations du socle et les chevauchements associés de Lure .

Seismotectonics and reactivated late Hercynian basement in Southeastern France.

Keys words.- Seismotectonics, Focal mechanisms, Active faults, Geodynamic implication, Hercynian, Southeastern France.

Abstract.- In the Provencal basement, a prefaulted late Hercynian system, hidden beneath the Meso-Cenozoic cover, is evidenced from seismic distribution and analysis of focal mechanisms. This system extends roughly in a N40° to N50° direction from the Durance fault betwen the Argentera and Pelvoux Massifs. It is composed of senestrial strike-slip faults with a small inverse component which is more important in the South-western part of the zone in front of the Digne nappe. The lateral extrusion of a block which is delimited to the North with the Belledonne-Mont Blanc dextral fault and to the South with our senestrial strike-slip faults system is consistent with the dextral strike-slip system which follows the bend of the external western border of the Alpine belt. It also agrees with the geodynamical model at present admitted for the Alps namely a post-collision regime limited to the end of the convergence of Apulian and African plates with a likely conterclockwise rotation of the Adriatic plate. Finaly the lateral extrusion of the block may be responsible for the ondulation of the basement and the derived overlaps of the Lure Moutain.

Introduction

L'architecture du socle hercynien provençal, masquée sur sa majeure partie par la couverture méso-cénozoïque n'est connue de façon précise que dans le massif des Maures et de l'Esterel (Bronner, 1993). Ce socle, a été localement repris au cours des phases pyrénéo-provençales (100-30Ma), suivies à la fin de l'Oligocène de l'ouverture du bassin Liguro-provençal et de la dérive du bloc corso-sarde entre 23 et 19Ma (Guieu et Roussel, 1998). Il est encore remobilisé au Néogéne par la compression Alpine (Tricart,1984 ; Lemoine *et al* ., 2000 ; Schmid et Kissling, 2000) et la flexuration de la marge continentale mio-pliocéne (Guieu et Roussel, 1998). Les structures héritées de ces événements successifs, pourraient contrôler encore aujourd'hui une partie de la sismicité observée dans le Sud-Est de la France et la Provence, comme, la faille de la Durance,(B.R.G.M, 1981 ; Combes, 1984 ; Fourno et Roussel, 1990 ; Fourno *et al*., 1993). Dans cette hypothèse l'étude des séismes de profondeur adaptée est une approche possible pour caractériser ces structures remobilisées du socle. A cet effet les données recueillies, depuis les années quatre vingt, par les différents réseaux sismiques régionaux (Rénass, SISMALP et LDG) permettent une analyse fine de la localisation et de la profondeur des foyers sismiques (Fourno et Roussel, 1990 ; Fourno *et al*., 1993) ainsi que la détermination d'un nombre conséquent de mécanismes au foyer (Fréchet , 1978 ; Fréchet et Pavoni, 1979 ; Béthoux *et al*., 1988 ; Nicolas *et al*., 1990 ; Deverchère *et al*., 1991 ; Béthoux *et al*., 1992 ; Maddedu *et al*., 1996 ; Eva *et al*.,1997 ; Eva et Solarino.,1998 ; Sue *et al*., 1999 ; Volant *et al*., 2000 ; Barroux *et al*., 2001).
Cette analyse sismotectonique est d'un intérêt primordial pour caractériser la reprise alpine du socle tardi-hercynien.

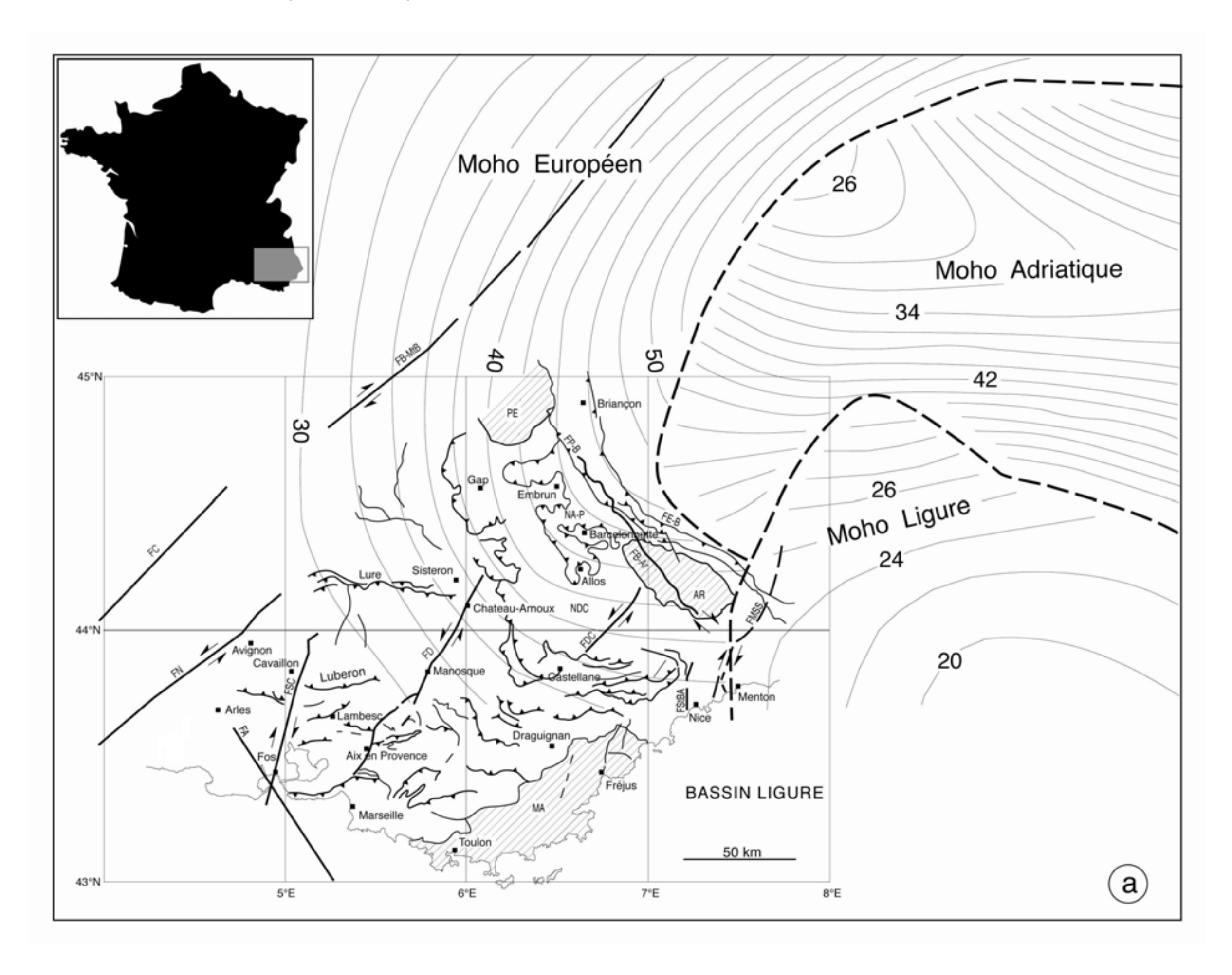
Contexte géodynamique et tectonique du Sud-Est de la France

La géodynamique de l'arc alpin et son incidence sur la tectonique provençale sont contrôlées par le déplacement relativement complexe d'un système de quatre plaques dont le modèle d'évolution est encore en discussion.

1. Université Paul Cézanne , Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix en Provence cedex 04 (France). jean-pierre.fourno@univ-cezanne.fr
2. Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix en Provence cedex 04 (France). dussouillez@cerege.fr

La convergence puis la collision de la plaque Eurasienne, au Nord, et de la plaque Africaine au Sud, entre lesquelles se situent les deux micro-plaques Ligure, au Sud-ouest, et Adriatique au Nord-est (Jolivet *et al*., 1994 ; Jolivet, 1995 ; Jolivet et Facenna, 2000), débute vers 35 Ma (Schmid et Kissling, 2000). Le déplacement vers le Nord de la plaque Adriatique induit un ensemble de cisaillements dextres dans les Alpes occidentales, leur forme arquée est accentuée pendant la phase post-collisionnelle par une nouvelle orientation du mouvement vers l' Ouest-nord-ouest et par la rotation antihoraire de la plaque Adriatique (Schmid et Kissling, 2000). Champagnac *et al* (2004) et Champagnac (2006) proposent, au Miocène, l'extrusion latérale vers le Sud d'un bloc en relation avec l'ouverture de la mer Ligure. L'évolution au cours du Néogène jusqu'au présent est caractérisée par le passage à un régime post-collisionel (Sue et Tricart, 2002 ; Champagnac *et al.*, 2004 ; 2006 ; Sue *et al.*, 2007). Un découplage entre zones interne et externe s'effectue le long du front pennique briançonnais (FPB). L'ensemble de ces mouvements sont responsables d'une déformation extensive miocène parallèle à la chaîne en zone interne. A la fin du Miocène, le soulèvement des massifs cristallins induit les chevauchements et plissements des nappes de Digne et un ensemble de cisaillements dextres parallèles à la chaîne. Dans le Briançonnais l'extension perpendiculaire à la chaîne est la conséquence de l'exhumation et du soulèvement des massifs cristallins internes et externes puis du rééquilibrage gravitationnel post-orogénique. Cet équilibrage gravitaire ainsi que la rotation de la plaque Adriatique se poursuivent actuellement (Champagnac *et al.*, 2006 ; Delacou, 2004).

La croûte continentale en Provence possède une épaisseur normale de l'ordre de 30 km (Labrouste *et al*., 1968). Vers l'ouest elle s'amincit (26 km) dans la région du Bas-Rhône par le jeu de la distension jurassique voire oligocène. (Sapin et Hirn, 1974 ; Guieu et Roussel, 1990). Elle s'épaissit, plus à l'Est, sous le massif des Maures (Recq, 1970 ; 1972 ; 1973) et dans le centre des Alpes occidentales (35 et 54 km), où les campagnes internationales de sismique réflexion profonde ECORS-CROP (Roure *et al*., 1996) et NRP-20 (Pfiffner *et al*., 1997) et combinées avec des données sismique-réfraction et gravimétriques, permettent de caractériser les profondeurs du Moho et l'extension respective des plaques Européenne, Adriatique et Ligure (Waldhauser *et al*., 1998 ; Schmid et Kissling, 2000) (fig. 1a).



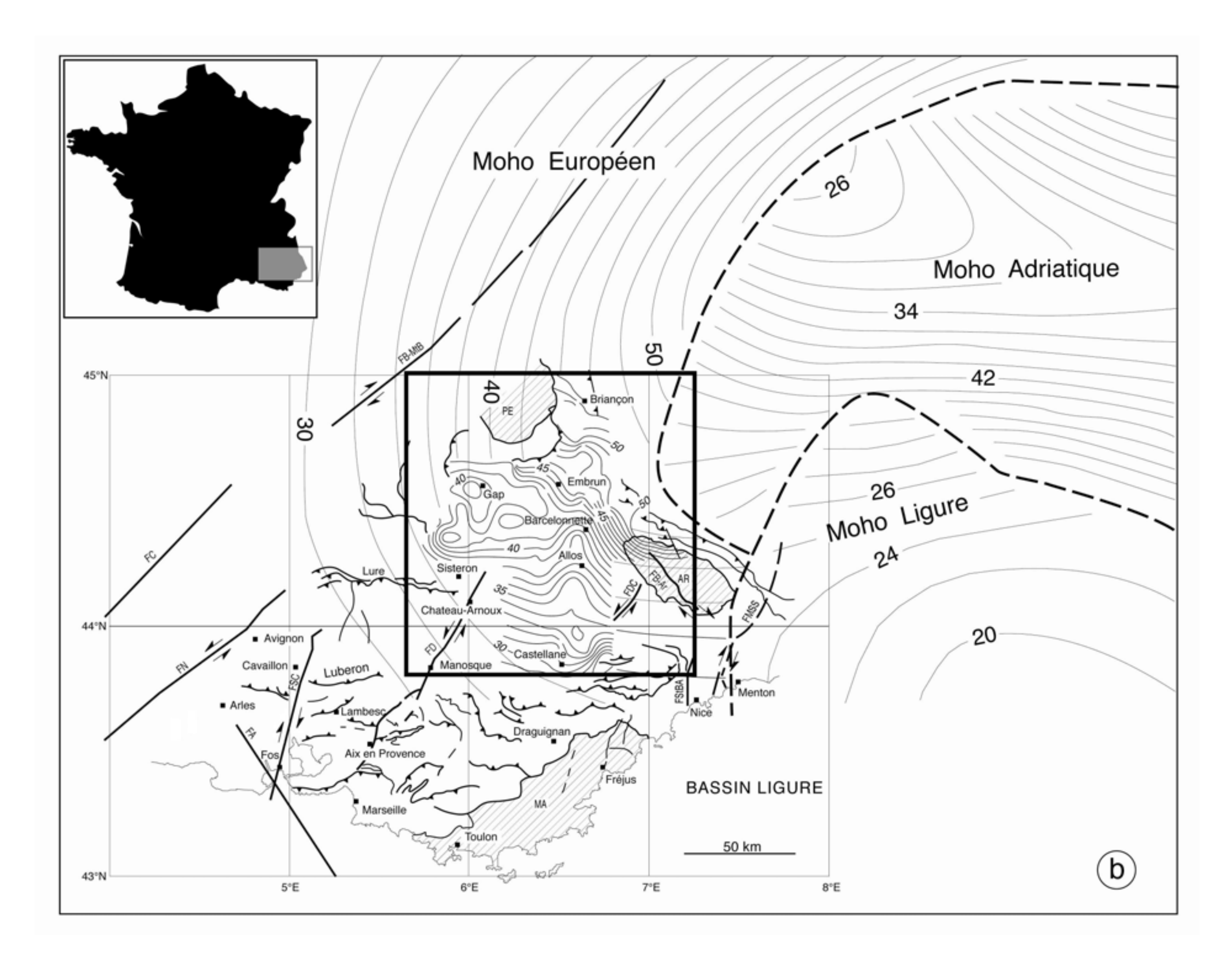


FIG. 1.- Profondeur de la discontinuité de Mohorovicic : a) d'après Waldhauser *et al*., (1998),Schmid et Kissling (2000) (isobathes en kilomètre). Le rectangle en trait fin délimite la carte tectonique de la fig. 2. b) d'aprés Thouvenot *et al* (2007) dans le carré en trait gras.

FIG. 1.- Moho depth : a) after Waldhauser *et al*., (1998), Schmid and Kissling (2000). Isobaths are in km. The rectangle in thin line locates the tectonic map of fig. 2. b) after Thouvenot *et al* (2007) in the square in thick line.

Thouvenot *et al* (2007) précisent les isobathes de Moho et déterminent entre le Pelvoux et l'Argentera l'épaississement (40 km), déjà évoqué par Labrouste *et al* (1968) et Ménard (1979), de la croûte le long de la vallée de la Durance (fig. 1b). Cet ensellement structural correspond à la zone de développement vers le Sud-ouest des nappes de l'Embrunais-Ubaye (Kerckhove, 1969).

Le socle hercynien Provençal est connu par les affleurements des formations métamorphiques du Massif des Maures et de la région de Toulon-Cap Sicié à l'Est. Ailleurs, la profondeur du socle est déterminée par des inversions de données sismologiques (Raffaele *et al*., 2004), des interprétations (Arthaud *et al*., 1980) de sismique-réfraction (Recq, 1970 ; 1972 ; 1973) ainsi que des données pétrolières (Ménard, 1979 ; 1980; fig. 2). La faille de la Durance limite à l'Est un compartiment de socle sub-affleurant et à l'Ouest un compartiment où le socle s'enfonce très rapidement à une profondeur excédant 6000m (Curnelle et Dubois, 1986 ; Tempier, 1987).

Le réseau de cassures tardi-hercyniennes (Debelmas, 1986 ; Debelmas et Mascle, 1997) est repris au cours du rifting jurassique (Lemoine *et al*., 2000) avec les failles d'extension orientées NE-SW (failles des Cévennes, de Nîmes, Belledone-Mt Blanc, et de la Durance) et les failles de décrochement orientées NW-SE (failles Arlésienne (Mauffret et Gorini, 1996 ; Muller *et al*., 1996), faille Argentera-Bercézio) (fig.2). La faille Argentera-Bercézio correspond à un couloir de décrochement et de transfert particulièrement important (Debelmas et Mascle, 1997 ; Lemoine *et al* ., 2000 ; Debelmas, 2001). Ces structures seront plus ou moins réemployées ultérieurement lors de la compression alpine, permettant l'individualisation de failles inverses, de chevauchements et de grandes nappes de charriages.

Dans la zone externe des Alpes occidentales les failles NE-SW sont conservées. Ces failles contrôlent la déformation des séries de couverture du Secondaire et du Tertiaire ainsi que l'organisation sédimentaire de la région depuis l'Oligocène (Triat et Truc, 1983 ; Tempier, 1987). Les failles E-W du massif des Maures recoupent le socle (Bronner, 1993). Les chevauchements provençaux de même orientation (Aurélien, Sainte-

Baume, Etoile.... et Trévaresse) sont gravitaires (Guieu et Roussel, 1990 a et b). Dans la Trévaresse se situe le foyer du séisme de Lambesc de 1909 (M= 6.2), le plus violent du 20e siècle sur le territoire français (Chardon *et al*., 2005).

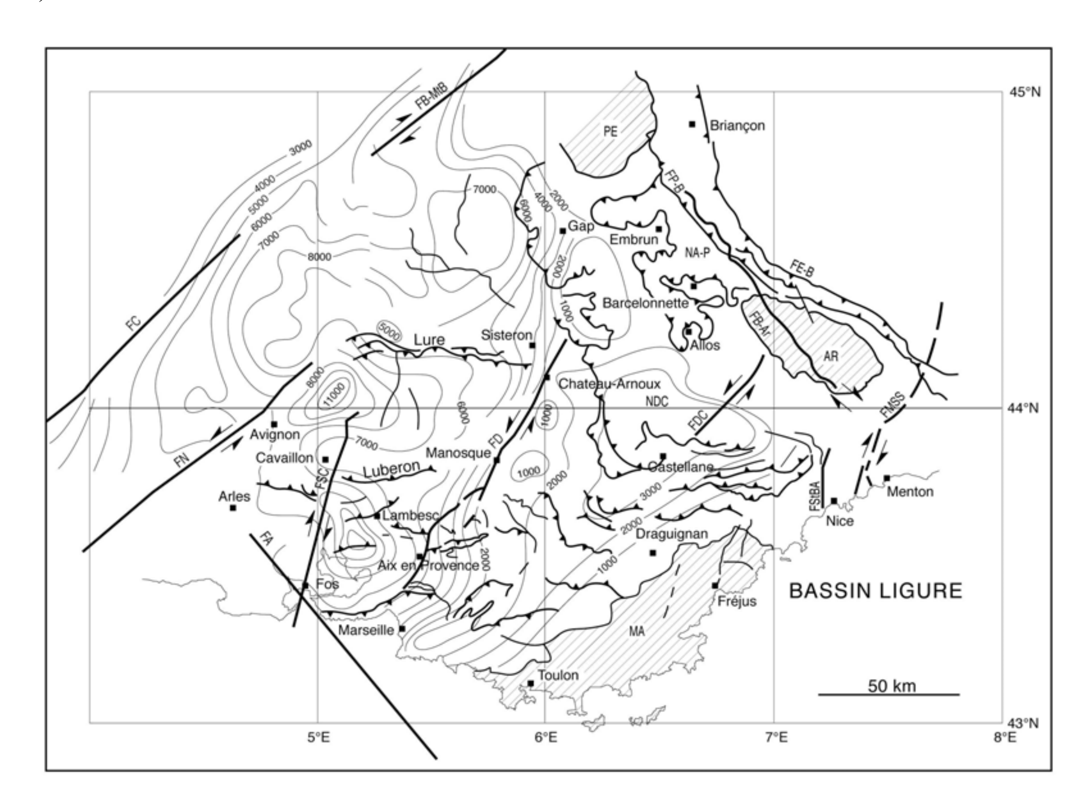


FIG. 2.- Profondeur du socle antétriasique d'après Ménard (1979; 1980), (isobathe en mètre, trait fin continu) et schéma tectonique du Sud-est de la France. Trait épais: failles actives; FC des Cévennes, FN de Nîmes, FA Arlésienne, FB-MtB Belledonne-Mont Blanc, FSC Salon-Cavaillon, FD Durance, FDC Daluis-Castellane, FB-Ar Bercézio-Argentera-Serenne-Haute Durance, FMSS Monaco-Sospel-Saorge, FStBA St Blaise-Aspremont. Trait indenté: chevauchement, FP-B front Pennique Briançonnais, FE-B faille Est Briançonnaise, NA-P, nappes de l'Autapie et du Parpaillon, NDC nappes de Digne et Castellane . PE, Massif du Pelvoux. AR, Massif de l'Argentera. MA, Massif des Maures.

FIG. 2.- Depth of the Antetriasic basement after Ménard (1979; 1980) and tectonic sketch of Southeastern France. Thin lines: isobaths of the basement in meters; thick lines: active faults; FC Cevennes fault, FN Nimes fault, FA Arles fault, FB-MtB Belledonne-Mont Blanc fault, FSC Salon-Cavaillon fault, FDC Daluis-Castellane fault, FB-Ar Bercézio-Argentera-Serenne-Haute Durance fault, FMSS Monaco-Sospel-Saorge fault, FStBA St Blaise-Aspremont fault. Barded lines, overlaps. FP-B Pennique-Briançon front, FE-B Est Briançon fault, NA-P Autapie and Parpaillon overlaps, NDC Digne and Castellane overlaps. PE Pelvoux Massif. AR Argentera Massif. MA Maures Massif.

Dans la zone interne, la tectonique compressive a repris les structures où les paléo-failles ont joué un rôle déterminant. Le régime tectonique général de la zone briançonnaise au Néogéne est extensif, parallèle à la chaîne, avec des failles normales associées à des décrochements importants (Sue et Tricart, 2003 ; Champagnac *et al*, 2006)) (fig. 3a). Les failles transverses sont postérieures aux phases alpines de compression et sont actuellement actives (Delacou, 2004 ; Champagnac *et al*, 2006). Ce sont les failles de la Font Sancte-Pic des Houerts à l'Est de la faille Serenne-Argentera (Sue, 1998 ; Lemoine *et al*., 2000 ; Sue *et al*, 2007). Dans leur prolongement à l'Ouest, dans la zone externe, des failles NE-SW recoupent les nappes de flyschs du Parpaillon (fig. 3a et fig. 3b) (Sue, 1998). Quant au séisme historique de St Paul sur Ubaye (Ml=5.3 du 5 avril 1959 (Vogt, 1979)), la solution du mécanisme au foyer (Ménard, 1988) est compatible avec les deux systèmes de failles (transverse en décrochement sénestre et parallèle en décrochement dextre). Il pourrait être associé à un décrochement sénestre sur le système de failles transverses (Font Sancte-Pic des Houerts) compte tenu de la répartition géographique des dégâts obsevés qui sont importants et bien développés sur l'axe transverse, Ceillac-Serenne-Saint Paul/Ubaye-Barcelonnette, et au contraire réduits dans la direction longitudinale, Vars-Meyronne

(Rothé et Dechevoy, 1967) .

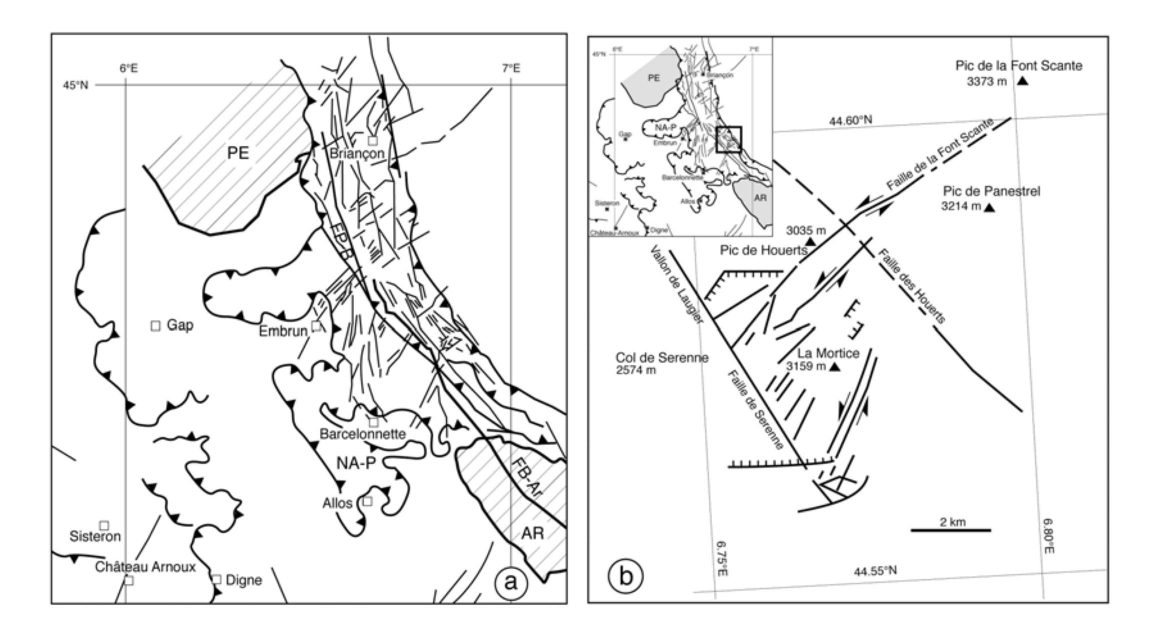


FIG. 3.- a) Tectonique de la nappe du Parpaillon (NA-P) et du Briançonnais. Faille Bercézio-Argentera-Serenne-Haute Durance (FB-Ar) . Front Pennique Briançonnais (FP-B). Massifs, du Pelvoux (PE) de L'Argentera (AR). D'après Sue et Tricart (1999) . b) Failles actives transverses de la Font Sancte-Pic des Houerts. D'après Sue (1998).

FIG. 3.- a) Tectonics of the Parpaillon and Briançon nappes, after Sue et Tricart (1999). NA-P: Parpaillon and Briançon nappes, FB-Ar Bercezio-Argentera-Serenne-Haute Durance fault, FP-B Briançon Pennique front, PE Pelvoux Massif, AR Argentera Massif . b) Transverse active faults of the Font Sancte-Pic des Houerts, after Sue (1998).

Analyse de la sismicité instrumentale et des mécanismes focaux associées

Les données analysées proviennent des réseaux Rénass, LDG et Sismalp pour la période 1980-2005. Une étude thématique pour caractériser la profondeur des séismes est effectuée sur une base de données de 8018 événements (fig. 4a). La méthode d'interpolation utilisée est l'Inverse Distance Weighting (IDW) du logiciel Mapinfo : la profondeur en chaque cellule de la grille régulière est la moyenne pondérée par la distance élevée au carré des points de données. Compte tenu de la précision de la localisation des séismes et de la densité des données, la taille des cellules est prise égale à 4.5 km^2, l'influence des points de données est inversement proportionnelle au carré de leur distance et la distance maximale de recherche des données est fixée à 100km. Ce lissage détermine une surface moyenne de profondeur des foyers sismiques. Cette profondeur est caractérisée dans les zones à forte sismicité par la valeur observée la plus fréquente et dans les zones peu sismiques par une valeur extrapolée depuis les cellules voisines. La variation de la taille des cellules jusqu'à 10 km^2 ne modifie pas sensiblement le résultat du lissage. Pour avoir une analyse purement tectonique, les événements sismiques superficiels liés à l'exploitation minière du bassin de Gardanne ne sont pas utilisés dans le lissage présenté, bien que leur influence soit faible sur cette zone où la profondeur focale moyenne obtenue est de 1 km.
Par ailleurs cette étude met en évidence des axes de profondeur maximale des séismes. Certains de ces axes, peuvent être associés avec les failles majeures connues de Nîmes, de Salon-Cavaillon, de la Durance (NE-SW) et de l'Arlésienne et d'Argentera (NW-SE). Mais deux d'entre eux ne sont pas corrélés avec des accidents connus. Le premier, avec une densité sismique modérée, est grossièrement orienté Est-ouest. Il borde le Nord du massif des Maures depuis Fréjus jusqu'à la faille de la Durance et rappelle les fractures hercyniennes Est-ouest (Bronner, 1993). Le deuxième, avec une forte sismicité, est orienté NE-SW depuis le Nord-est de Château-Arnoux en direction de Barcelonnette-Embrun, dans le prolongement de la faille de la Durance (fig. 4b).
L'étude est complétée par l'analyse des mécanismes au foyer des séismes localisés dans le socle (Fréchet et Pavoni, 1979 ; Béthoux *et al*., 1988 ; Nicolas *et al*., 1990 ; Deverchère *et al*., 1991 ; Béthoux *et al*., 1992 ; Eva *et al*.,1997 ; Eva et Solarino.,1998 ; Sue *et al*., 1999 ; Volant *et al*., 2000 ; Maddedu *et al*., 1996 ; Barroux *et al*., 2001). Là où la profondeur du socle est inférieure ou égale à trois kilomètres (fig. 2) nous ne retenons que les mécanismes associés à une profondeur focale égale ou supérieure à quatre kilomètres, pour prendre en compte

l'erreur de localisation qui reste toujours importante pour la profondeur et éviter toutes confusions avec les structures de la couverture. 37 mécanismes au foyer sont ainsi retenus (fig. 5a et annexe 1).

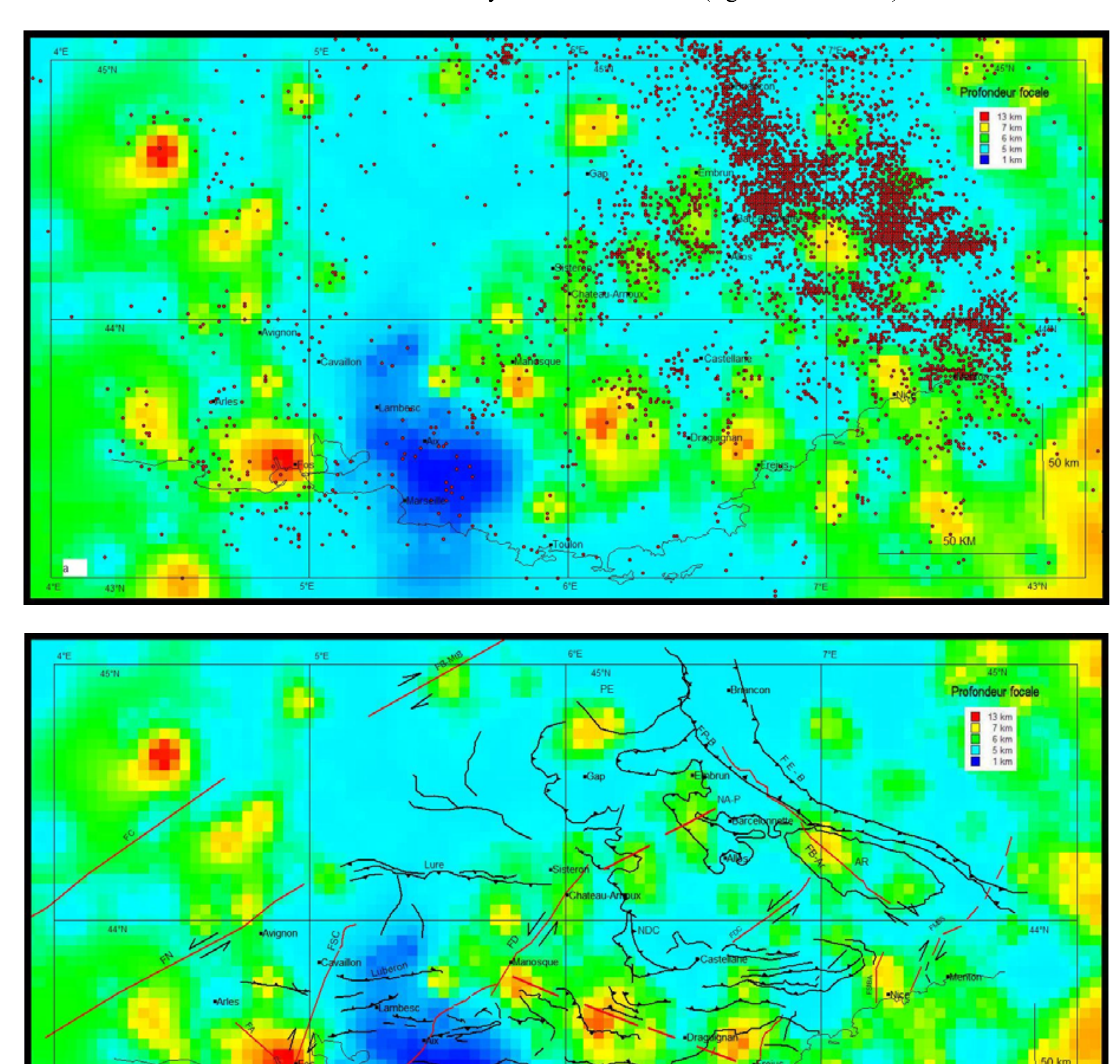
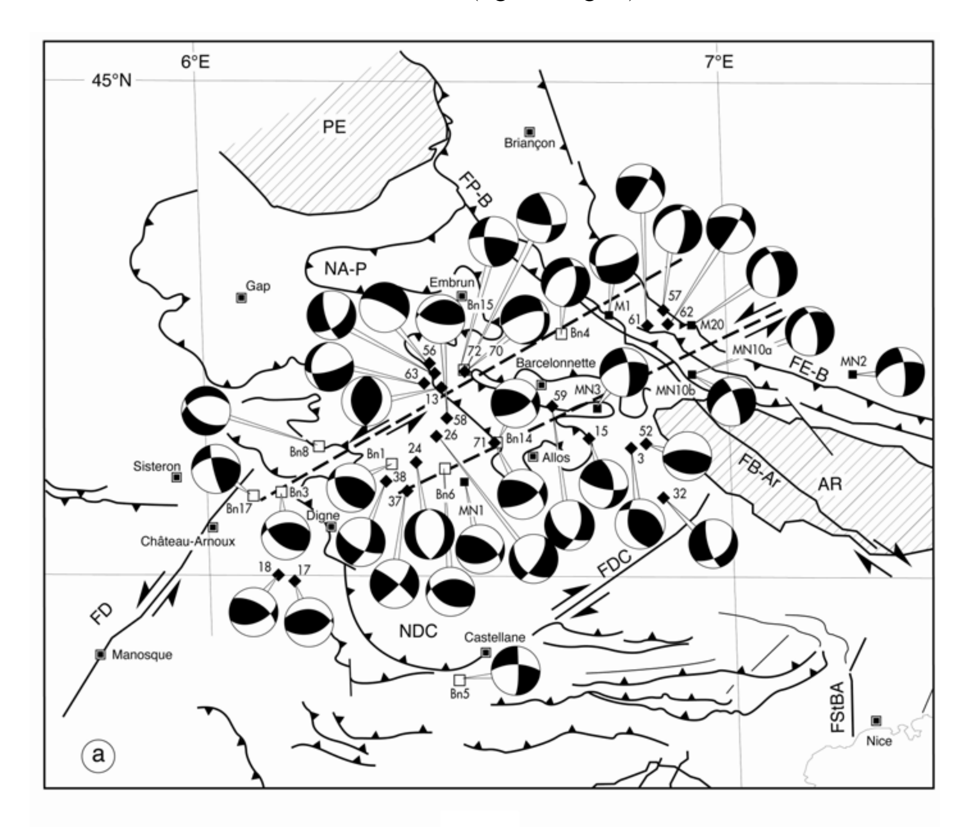


FIG. 4.- Etude thématique de la profondeur des foyers sismiques : a) Points rouges, épicentres de 1980 à 2005. b) Schéma tectonique du Sud-est de la France. Voir la légende fig 2 . Traits discontinus : axe sismo-tectonique masqué par la couverture des nappes de Digne et du Parpaillon.
FIG. 4.- Thematic analysis of hypocenters depth : a) Red points: epicenter of earthquakes betwen 1980 and 2005. b) Tectonic shetch of Southeastern France. See fig 2 for a full description. Broken lines : Seismotectonic axis hidden beneath the Digne- Parpaillon overlap.

Le long de l'axe orienté Est-ouest le seul mécanisme au foyer disponible correspond à un décrochement E-W sénestre compatible avec la direction des fractures hercyniennes. Le long de l'axe sismique orienté NE-SW, la densité des mécanismes au foyer est remarquablement forte. L'azimut moyen et l'écart type des plans de faille conjugués est respectivement de 74°±29° et 157°±28°. Nous constatons que 32 mécanismes au foyer, parmi les 37 retenus, sont compatibles entre eux (86%) et permettent de définir un réseau globalement orienté entre N40° et N50°, de plusieurs failles parallèles décrochantes N74°. Parmi les 5 mécanismes écartés dans l'interprétation précédente (n°3, 13, 24, 56, 59, fig. 5a et annexe 1) 2 correspondent à des failles inverses, 3 à des failles normales selon la direction conjuguée moyenne N155°. Cette configuration pourrait indiquer que le réseau de

failles N50° est en échelon. Ces failles sont sénestres au nord-est et au centre avec une composante inverse plus marquée vers le sud-ouest, au front de la nappe de Digne (fig. 5a et annexe 1). Ce réseau, qui s'étend depuis la région de Château-Arnoux Sisteron jusqu'à la faille de Serenne-Argentera, s'articule dans le prolongement de la faille majeure de décrochement sénestre de la Durance (fig. 3 et fig.5a).



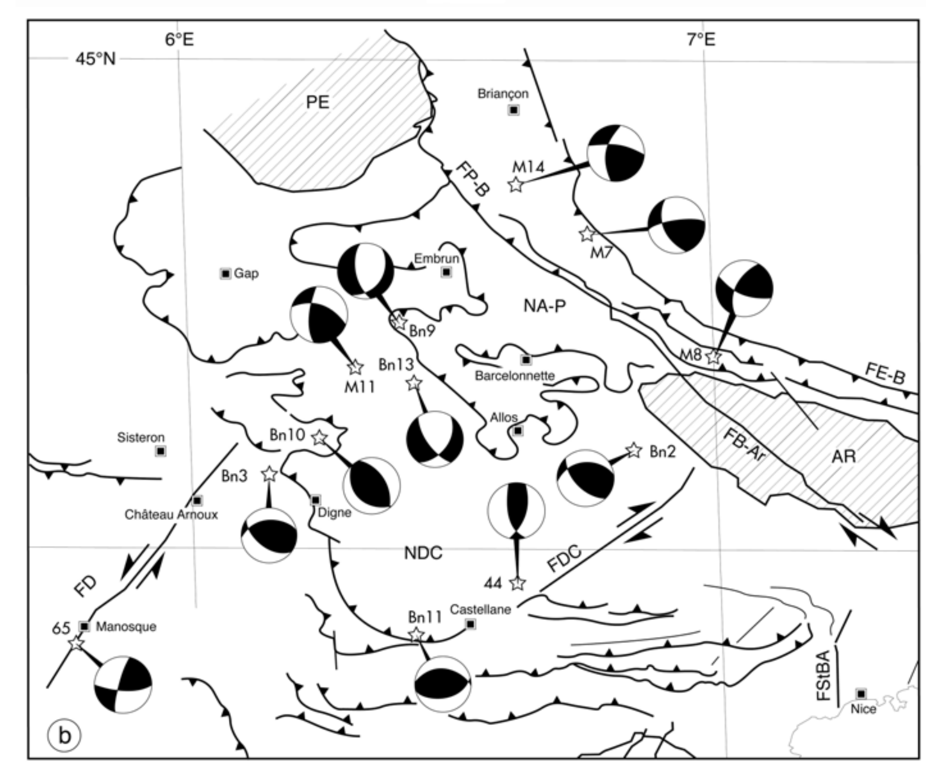


FIG. 5.- Mécanismes au foyer: a) des séismes de profondeur égale ou supérieure à quatre kilomètres, concernant l'axe sismique N40° à N50° . Le séisme de Castellane est associé à l'axe Fréjus-Manosque. b) des séismes de profondeur inférieure ou égale à trois kilomètres.

FIG. 5.- Focal Mechanisms of earthquakes: a) with depth agual or greather than for kilometers associated to the N40°-N50° seismic axis; The Castellane earthquake (Bn5) is linked to the Frejus-Manosque axis. b) with depth less or agual than three kilometers.

Discussion

L'étude de la sismicité associée au socle permet de caractériser une zone de cisaillement sénestre orienté N50° entre Chateau-Arnoux et Barcelonnette. Parallélement, une étude des mécanismes aux foyers des séismes situés dans la couverture (profondeur focale inférieure ou égale à 3km) montre que seulement 4 des 11 mécanismes disponibles sont associés à des failles en correspondances avec celles de la zone de cisaillement du socle (fig 5b et annexe 2). Pour les 7 autres mécanismes, on observe une grande disparité et aucun axe sismique privilégié n'est mis en évidence. Ces mécanismes montrent que la couverture est marquée par une sismicité différente de celle du socle et que l'influence tectonique du socle sur la couverture n'est pas déterminante.

Le réseau de failles du socle, quasiment parallèles, qui pourraient être en relais vient s'intégrer dans le système de décrochements dextres, généralisé à l'ensemble de la bordure externe occidentale de la chaîne alpine, depuis l'alignement du Wildhorn dans le Nord-Valais (Maurer et Diechmann, 1995 ; Maurer *et al*., 1997) jusqu'à la Haute-Durance-Serenne-Argentera-Bercézio (Sue, 1998 ; Sue *et al*., 1999 ; Sue et Tricart, 1999; Sue et Tricart, 2002) en passant par le décrochement des Aiguilles Rouges (Diechmann *et al*., 2002) et le front de Belledonne (Thouvenot *et al*., 2003). Ce système décrochant qui suit la forme arquée de la partie occidentale de la chaîne alpine, s'accorde avec le modèle de rotation antihoraire de la plaque Adratique (Gidon, 1974 ; Anderson et Jackson, 1987 ; Ménard, 1988 ; Calais *et al*., 2002 ; Collombet *et al*., 2002).

Cette zone de cisaillement profonde, en zone externe, est dans l'axe des failles transverses internes qui affectent à la fois le briançonnais et le piémontais avec les deux failles principales de la Font Sante-Pic des Houerts en Haute Ubaye au Sud, et du Guil au Nord, laquelle pourrait se prolonger dans la zone externe par la faille d'Embrun (Sue, 1998 ; Sue et Tricart, 2003). Cette dernière, non masquée par les nappes de l'Autapie et du Parpaillon marquerait la limite nord de la zone cisaillante mise en évidence par sa sismicité.

Par ailleurs, la vallée de la Durance située dans cette zone est caractérisée par un épaississement de la croûte (40 km) qui s'étend uniformément vers l'Ouest (Thouvenot et al ., 2007 ; fig(1b)). Cette vallée correspond également à un ensellement du socle entre les massifs cristallins externes du Pelvoux et de l'Argentera où se sont développées les nappes de l'Embrunnais-Ubaye (Kerckhove., 1969).

L'ensemble de ces constatations permet de penser que la sismicité profonde observée doit être associée à une structuration ancienne du socle qui est masquée par les nappes de Digne-Castellane et du Parpaillon et résulte de la réactivation en décrochements sénestres d'un réseau de paleo-failles-tardi-hercyniennes (fig. 5a et fig. 6). Cet accident majeur du socle découpe au sud un panneau qui est limitée au nord par le système de décrochement dextre de Belledonne- Mont Blanc et qui s'intègre dans la mosaïque du socle de la Provence. Une extrusion latérale, plus ancienne, de ce bloc vers le Sud-Ouest aurait alors pu jouer un rôle, à déterminer, dans les chevauchements Provençaux et plus particulièrement celui de Lure (fig. 6) .

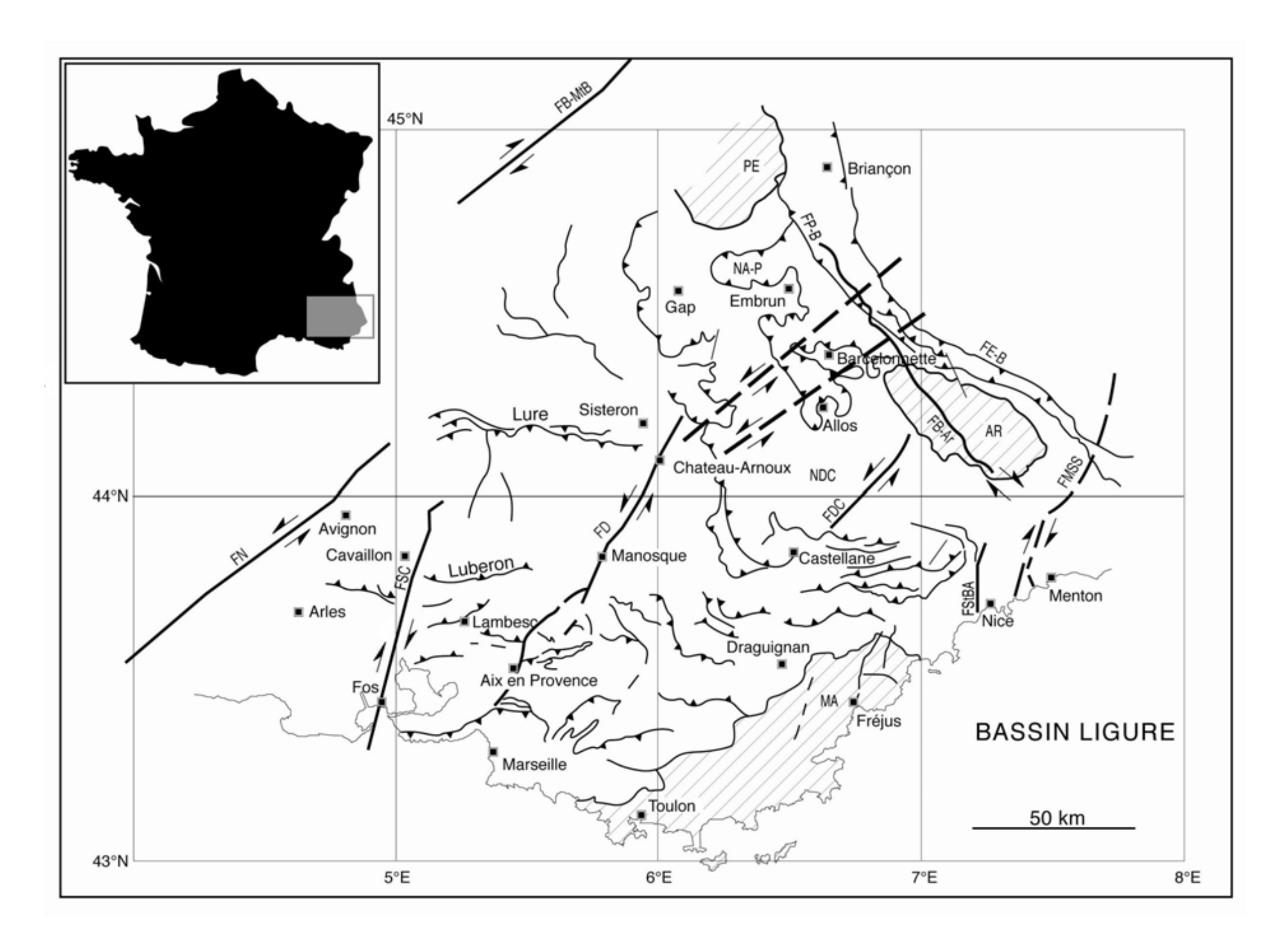


FIG. 6.- Schéma sismo-tectonique interprétatif de l'axe sismique N40° à N50° Château-Arnoux, Barcelonnette. Traits discontinus : axe sismo-tectonique masqué par la couverture des nappes de Digne et du Parpaillon.
FIG. 6.- Interpretative seismotectonic shetch of the N40°-N50° seismic axis. Broken lines : Seismotectonic axis hidden beneath the Digne- Parpaillon overlap.

Dans ce contexte la réactivation de ce réseau est lié à l'extension post-orogénique, le soulèvement relatif des zones internes par rapport aux zones externes, contribuerait à un régime tectonique caractérisé par une extension en zone interne et un régime équivalent en transpression-compression en zone externe (Delacou, 2004 ; Delacou *et al*., 2004).

Conclusion

La réactivation des accidents majeurs du socle hercynien provençal, masqué par les nappes de Digne-Castellane et du Parpallion, est caractérisée par la mise en évidence, à partir des mécanismes au foyer, d'un système orienté N40° à N50° de failles décrochantes sénestres N74° qui pourraient constituer un système en échelon. Ce réseau de failles s'accorde globalement avec le cadre de l'évolution géodynamique actuelle des Alpes caractérisée par un régime post-collisionnel lié à l'arrêt de la convergence Apulie-Europe, associé à une probable rotation de la plaque Adriatique. Le panneau de socle limité au nord par le système décrochant dextre Belledonne –Mont Blanc et au sud par le système décrochant sénestre Chateau-Arnoux Barcelonnette doit jouer un rôle fondamental dans la mosaïque du socle de la Provence et devra être pris en compte pour une compréhension plus approfondie de la tectonique provençale.

Remerciements : Nous remercions, chaleureusement, Jacques Roussel et Bernard Simon pour leurs conseils et aides au cours de ce travail, ainsi que Jean-Jacques Motte pour la réalisation des figures. Les auteurs remercient également le rapporteur anonyme pour ses commentaires critiques et constructifs qui ont permis d'améliorer la qualité de cet article.

Références

Anderson H, & Jackson J. (1987).- Active tectonics in the Adriatic region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society.*, **91**, 93-983.

Barroux E, Béthoux N, & Bellier O. (2001).- Analyses of the stress field in southeastern France from earthquake focal mechanism.- *Geophys. J. Int.*, **145**, 336-348.
Béthoux N, Cattaneo M, Delpech P.-Y, Eva C, & Rehault J.-P. (1988).- Mécanismes au foyer de séismes en Mer Ligure et dans le sud des Alpes occidentales : résultats et interprétations.- *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **307**, II, 71-77.
Béthoux N, Fréchet J, Guyoton F, Thouvenot F, Cattaneo M, Eva C, Nicolas M, & Granet M. (1992).- A closing Ligurian Sea ? .- *Pure appl. Geophys*., **139**, 179-194.
B.R.G.M. (1981).- Carte sismotectonique de la France. Présentation et mode d'emploi. Commentaire des cartouches. Mém. Bur. Rech. Géol. Min., 111, 36p.
Bronner G. (1993).- Relation sismicité-structure du socle provençal. Rapport LG2, Univ Cézanne, Marseille, 2 p.
Calais E, Nocquet J.-M, Jouanne F, & Tardy M. (2002).- Current strain regime in the Western Alps from continous Global Positioning System measurements 1996-2001. *Geology.*, **30**, 651-654.
Champagnac J.-D. (2004).- Tectonique cassante de l'arc interne des Alpes occidentales, implications géodyamiques. Thése univ. Grenoble I , Neuchâtel, 240 p.
Champagnac J.-D, Sue C, Delacou B, § Burkhard M. (2004).- Brittle deformation in the inner nothwestern Alps : from early orogen-parallel extrusion to late orogen-perpendicular collapse. *Terra Nova.*, **16**(4), 232-242.
Champagnac J.-D, Sue C, Delacou B, Tricart P, Allanic C § Burkhard M. (2006).- Miocene lateral extrusion in the inner western Alps revealed by dynamic fault analysis. *Tectonics.*, **25**, TC3014, doi:110.1029/2004TC001779
Chardon C, Hermitte D, Nguyen F, & Bellier O. (2005).- First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century. *Geology.*, **33**, 901-904.
Collombet M, Thomas J.-C, Chauvin A, Tricart P, Bouillin J.-P, & Gratier J.-P. (2002).- Counterclokwise rotation of the western Alps since the Oligocene: New insights from paleomagnetic data. *Tectonics.*, **21**, 352-366.
Curnelle R, & Dubois P. (1986).- Evolution mésozoïque des grands bassins sédimentaires français : bassin de Paris, d'Aquitaine et du Sud-Est. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (8), **II**(4), 529-546.
Debelmas J. (1986).- L'héritage Hercynien à l'origine des grands bassins sédimentaires Français Soc.Nat.Elf Aquitaine (production. F-64018 Pau Cedex).
Debelmas J, & Mascle G. (1997).- Les grandes structures géologiques. Masson, Paris. 299p.
Debelmas J. (2001).- La zone subbriaçonnaise et la zone valaisanne savoyarde dans le cadre de la tectonique de plaques. *Géologie Alpine*, Grenoble, **77**, 3-8.
Deichmann N, Baer M, Braunmiller J, Ballarin-Dolfin D, Bay F, Bernardi F, Delouis B, Fäh D, Gerstenberger M, Giardini D, Huber S, Kradolfer M, Marani S, Oprsal I, Schibler R, Schler T, Sellami S, Steimen S, Wiemer S, Wössner J, & Wyss A. (2002).- Earthquake in Switzerland and surrounding region during 2001. *Eclogae Geol. Helv.*, **95**, 249-261.
Delacou B. (2004).- Tectonique et géodynamique actuelle de l'arc alpin, Approche sismotectonique et modélisation numérique. Thèse univ. Neuchâtel, Nice Sophia-Antipolis, 272 p.
Delacou B, Sue C, Champagnac J.-D, & Burkhard M. (2004).- Present-day geodynamics in the bend of the western and crustal Alps as constrained by earthquake analysis, *Geophys. J. Int.*, **158**, 753-774.
Deverchère J, Béthoux N, Hello Y, Louat R, & Eva C. (1991).- Déploiement d'un réseau de sismographes sou-marins et terrestres en domaine ligure (Méditerranée): campagne SISBALIG I. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **313**, II, 1023-1030.
Eva E, Solarino S, Eva C, & Neri G. (1997).- Stress tensor orientation from fault plane solutions in the southwestern Alps. *J. Geophys.Res*., **102**(B4), 8171-8185.
Eva E, & Solarino S. (1998).- Variations of stress directions in the western Alpine arc. *Geophys. J. Int*., 135, 438-448.
Fourno J.-P, & Roussel J. (1990).- La sismicité instrumentale en Provence de 1983 à 1986 d'après le réseau local I.N.S.U. *Géolgie Alpine*, Grenoble, **15**, 105-115.
Fourno J.-P, Roussel J, & Lecorche J.-P. (1993).- La sismicité instrumentale récente de la Provence dans son cadre sismo-tectonique. *Géolgie Méditerranéenne*, Marseille, **XX** (1) 7-23.
Fréchet J. (1978).- Sismicité du SE de la France et une nouvelle méthode de zonage sismique. Thése univ. Grenoble I , 159 p.
Fréchet J, & Pavoni N. (1979).- Etude de la sismicité de la zone briançonnaise entre Pelvoux et Argentera (Alpes Orientales) à l'aide d'un réseau de stations portables. *Eclogae, Geol, Helv*., **72**, 763-779.
Gidon M. (1974).- L'arc alpin a-t-il une origine tourbillonnaire ?. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **278**, 21-24.
Guieu G, & Roussel J. (1988).- Le Bassin Liguro-Provençal (Méditerranée Nord-occidentale) et ses relations avec les plissements provençaux et languedociens : arguments en faveur d'un bombement crustal précédant le rifting oligocéne. *Géolgie Méditerranéenne*, Marseille, **XV** (2) 123-141.
Guieu G, & Roussel J. (1990a).- Arguments for the pre-rift uplift and rift propagation in the Ligurian-Provençal basin (Northwestern Mediterranean) in the ligth of Pyrenean Provençal Orogeny. *Tectonics.*, **9**, 5, 1113-1142.
Guieu G, & Roussel J. (1990b).- Conséquence possible de l'extension crustale pré-oligocène en Provence méridionale : la mise en place gravitaire des chevauchements. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **311**, II, 485-492.
Jolivet L, Brun J.-P Gautier P, Lallemant S, & Patriat M. (1994).- 3-D kinematics of extension in the Aegean from the early Miocene to the Present, insight from the ductile crust. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **165**, 195-209.
Jolivet L. (1995).- La déformation des continents: exemples régionaux. Hermann, Paris, 305-374.
Jolivet L, & Facenna C. (2000).- Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics.*, **19**, 6, 1095-1106.
Kerckhove C. (1969).- La zone du Flysh dans les nappes de l'Eais-Ubaye (Alpes occidentales). *Géolgie Alpine*, Grenoble., **45**, 5-204.
Labrouste Y, Baltenberger P, Perrier G, & Recq M. (1968).- Courbes d'égale profondeur de la discontinuité de Mohorovicic dans le Sud-Est de la France. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **266**, D, 663-665.
Lemoine M, Graciansky Ch.de , & Tricart P. (2000).- De l'océan à la chaîne de montagnes. Tectonique de plaques dans les Alpes. Ed. Soc. géol. Fr. Et Gordon & Breach, 207 p.
Madeddu B, Béthoux N, & Stéphan J.-F. (1996).- Champ de contrainte post-pliocéne et déformation récentes dans les Alpes sud-occidentales. *Bull. Soc. Géol. France.*, **167**, 6, 797-810.

Mapinfo Professional Version 8.0. Mapinfo Corporation.
Mauffret A, & Gorini C. (1996).-Structural style and geodynamic evolution of Camargue and Western Provencal basin, southeastern France. *Tectonics*., **15**, 2, 356-375.
Maurer H, & Deichmann N. (1995).- Microearthquake cluster detection based on waveform similarities, with an application to the western Swiss Alps. *Geophys. J. Int.*, **123**, 588-600.
Maurer H, Burkhard M, Deichmann N, & Green G. (1997).- Active tectonism in central Alps: Contrasting stress regimes north and south of the Rhone Valley. *Terra Nova.*, **9**, 91-94.
Ménard G. (1979).- Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le Sud-Est de la France ; essai d'utilisation des données géophysiques. Thèse univ. Grenoble I , 179 p.
Ménard G. (1980).- Profondeur du socle antétriasique dans le Sud-Est de la France. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **290**, D, 299-302.
Ménard G. (1988).- Structure et cinématique d'une chaîne de collision : Les Alpes occidentales et centrales. Thèse de Doctorat d'état, univ. Grenoble I, 278 p.
Muller J, Guieu G, Cornée J.-J, Saint Martin J.-P, Ferrandini J, Berastegui X, & Puigfabregas C. (1996).- Carte de la fracturation de la Méditerranée occidentale et de ses bordures. GSC, Univ Provence, Marseille .
Nicolas M, Santoire J.-P, & Delpech P.-Y. (1990).- Intraplate seismicity : new seismotectonic data in Western Europe. *Tectonophysics.*, **179**, 27-53.
Pfiffner O.-A, Lehner P, Heitzmann P, Mueller S, & Steck A. (1997).- Deep structure of the Alps : Results From NRP 20. Birkhäuser, Basel,Switzerland, 380p.
Raffaele R, Fourno J.-P, & Gresta S. (2004).- Minimum 1D velocity model from local earthquake data in the Provence. *Stud. Geophys. Geod,* Prague, **48**, 731-740.
Recq M. (1970).- Courbes d'égale profondeur de la discontinuité de Mohorovicic en Provence. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, **270**, D, 11-13.
Recq M. (1972).- La structure profonde de la croûte terrestre sous le massif de l'Estérel. *Boll. Geof. Teor. Appli.*, **XIV**(55), 253-267.
Recq M. (1973).- Contribution à l'étude de la structure profonde de la croûte terrestre dans la région de Nice. *Boll. Geof. Teor. Appli.*, **XV**(58), 161-179.
Rothé J-P, & Dechevoy N. (1967).- La séismicité de la France de 1951 à 1960. Ann I.P.G Strasbourg., **3**, 67-71.
Roure F, Bergerat F, Damotte B, Mugnier J.-L, & Polino R. (1996).- The ECORS-CROP Alpine Seismic Traverse. *Mem. Soc. Géol. France*, 170.
Sapin M, & Hirn A. (1974).- Result of explosion seismology in the southern Rhône valley. *Ann. Geophys*., 30, 2, 181-202.
Schmid S.-M, & Kissling E. (2000).- The arc of the western Alps in the ligth of geophysical data on deep crustal structure. *Tetonics.*, **19**, 1, 62-85.
Sue C. (1998).- Dynamique actuelle et récente des Alpes occidentales internes – Approche structurale et sismologique. Thèse univ. Grenoble I, 325 p.
Sue C, Thouvenot F, Fréchet J, & Tricart P. (1999).- Widespread extension in the core of the western Alps revealed by earthquake analysis. *J. Geophys. Res.*, **104(**B11), 25611-25622.
Sue C, & Tricart P. (1999).- Late Alpine brittle extension above the Frontal Pennine Thrust near Briancon, Western Alps. *Eclogae Geol. Helv.*, **92**, 171-181.
Sue C, & Tricart P. (2002).- Widespread post-nappe normal faulting in the Internal Western Alps : a new constrain on arc dynamic. *J. Geol. Soc. London.*, **159**, 61-70.
Sue C, & Tricart P. (2003).- Neogene ongoing normal faulting in the inner western Alps : a major evolution of the late alpine tectonics. *Tectonics.*, **22**(5), 1050-175.
Sue C, Delacou B, Champagnac J.-D, Tricart P, Allanic C § Burkhard M. (2007).- Extensional neotectonics around the bend of the Western/Central Alps: an overview. *Int. J. Earth. Sci (Geol Rundsh)*., DOI 10.1007/s00531-007-0181-3.
Tempier C. (1987).- Modèle nouveau de mise en place des structures provençales. *Bull. Soc. Géol.Fr.*, **III**(8), 533-540.
Thouvenot F, Frechet J, Jenatton L, & Gamond J.-F. (2003).- The Belledonne Border Fault: Identification of active seismic strike-slip fault in the western Alps. *Geophys. J. Int*., **155**(1), 174-192.
Thouvenot F, Paul A, Frechet J, Béthoux N, Jenatton L, & Guiguet R. (2007).- Are there really superposed Mohos in the southwestern Alps? New seismic data from fan-profiling reflections. *Geophys. J. Int*., **170**(3), 1180-1194.
Triat J.-M, & Truc G (1983).- Le rôle des failles N50 dans la sédimentation des temps méso- et cénozoïques et dans l'évolution tectonique du bassin du SE (France). *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine.*,**7**(1),425-432.
Tricart P. (1984).- From passive margin to continental collision: A tectonic scenario for the western Alps. *Am. J. Sci*., **284**, 97-120.
Vogt J.(1979).- Les tremblements de terre en France. Mémoire du BRGM ., **96**, 203-204.
Volant P, Berge-Thierry C, Dervin P, Cushing M, Mohammadioun G, & Mathieu F. (2000).- The South Eastern Durance Fault Permanent Network: Preliminary Results. *J. Seism*., **4**, 175-189.
Waldhauser F, Kissling E, Ansorge J §Mueller S. (1998).- 3D interface modeling with 2D seismic data: The Alpine crust-mantle boundary. *Geophys. J. Int*., **135**, 264-278.

Annexe 1

an	mois	jour	heure	minute	seconde	latitude	longitude	profondeur	magnitude	Localisation	Compatible dans la zone	azA	dipA	rakeA	azB	dipB	rakeB	azP	dipP	azT	dipT	REF
1959	4	5	10	48	0	44.53	6.78	8	5.3	M1	oul	171			67			32		296		F1
1969	11	22	7	49	15	44.26	6.81	-7	3.6	3	non	166	60	127	290	46	44	231	8	128	58	F
1977	8	9	15	31	24	44.51	6.92	-4	3.6	M20	oui	165			62			210		108		F1
1980	3	15	8	0	47.86	44.225	6.35	-5	3.8	Bn1	oui	147	45	124	284	54	61	34	5	135	67	Ba
1983	3	20	16	1	31.1	44.38	6.45	-6	3.9	13	non	10	40	114	160	54	71	263	7	18	73	N
1983	12	22	18	12	21	44.28	6.73	-6	3.5	15	oui	356	57	155	100	70	36	226	8	322	39	B1
1984	6	19	11	40	37.2	43.99	6.16	-10	4.1	17	oui	278	44	109	73	49	73	175	2	276	77	N
1984	6	30	19	34	5.08	44	6.13	-6	3.8	18	oui	300	55	129	65	51	48	3	2	269	59	N
1986	1	17	20	27	19	44.23	6.4	-6	3.6	24	non	10	43	-107	167	49	-75	13	78	268	3	B1
1986	3	23	13	59	23.9	44.28	6.44	-7	3.7	26	oui	140	40	-25	30	74	-127	339	47	93	20	N
1987	5	9	6	0	17	44.16	6.87	-6	3.4	32	oui	50	47	-152	160	70	-47	25	47	280	14	B1
1988	3	26	12	17	10.29	44.491	6.68	-7	3.7	Bn4	oui	8	56	-57	237	46	-129	222	63	121	6	Ba
1988	8	5	22	1	33.25	43.788	6.47	-5	3.6	Bn5	oui	270	70	-171	3	82	-20	228	20	135	8	Ba
1989	6	29	10	40	3.25	44.41	7.24	-11	3.2	MN2	oui	354	73		254	60		217	34	122	9	M
1989	2	12	3	52	3.7	44.19	6.49	-9	3.8	MN1	oui	302	60		74	41		12	10	261	63	M
1989	2	12	3	52	3.45	44.22	6.45	-10	3.8	Bn6	oui	259	48	59	121	50	120	190	1	97	67	Ba
1990	5	7	14	20	51.7	44.34	6.75	-5	2.9	MN3	oui	255	58	-171	350	82	-32	217	28	118	16	M
1990	6	29	1	19	0	44.17	6.38	-6	3.1	37	oui	309	86	166	40	76	4	355	7	264	13	D
1990	6	29	8	55	0	44.19	6.34	-6	2.8	38	oui	18	64	-158	118	70	-28	340	33	247	4	D
1991	2	7	0	46	55.36	44.41	6.93	-6	3.3	MN10a	oui	347	67		220	35		218	59	97	18	M
1991	2	7	0	46	55.36	44.41	6.93	-6	3.3	MN10b	oui	340	75		240	57		205	35	107	12	M
1992	1	2	2	12	0	44.41	6.44	-8	2.3	50	oui	50	55	-30	158	66	-141	18	44	282	7	S
1992	4	19	22	24	53.25	44.261	6.21	-5	3	Bn8	oui	121	54	-118	259	44	-57	89	67	192	5	Ba
1993	5	5	4	34	0	44.27	6.84	-10	1.2	52	oui	115	25	110	273	67	81	10	21	166	67	S
1994	6	27	17	48	0	44.43	6.43	-7	2.7	56	non	165	15	-140	294	80	-78	190	53	34	34	S
1994	9	24	4	18	0	44.54	6.88	-4	2.5	57	oui	5	70	-70	232	28	-133	246	60	110	22	S
1994	11	13	0	36	0	44.32	6.46	-7	1.4	58	oui	100	70	100	253	22	64	182	24	26	64	S
1994	11	28	8	28	0	44.34	6.66	-9	1.8	59	non	15	60	-140	128	56	-37	340	48	72	2	S
1995	10	13	22	7	0	44.51	6.85	-6	2.9	61	oui	340	70	-40	234	53	-155	203	42	103	11	S
1995	10	18	2	13	0	44.51	6.89	-4	2.1	62	oui	135	55	-70	347	40	-116	354	72	239	8	S
1996	8	9	17	31	0	44.39	6.42	-7	1.7	63	oui	75	70	-120	196	36	-36	23	55	143	19	S
1997	10	22	4	51	0	44.41	6.52	-9	2.1	70	oui	20	20	-40	252	77	-106	181	55	329	31	S
1997	10	31	4	23	43.42	44.266	6.55	-5	4.7	Bn14	oui	158	53	159	261	73	39	25	13	126	39	Ba
1997	10	31	4	23	0	44.27	6.55	-5	4	71	oui	60	60	50	299	48	138	177	7	277	55	S
1997	11	6	12	39	0	44.41	6.52	-9	3.1	72	oui	95	75	30	357	61	163	223	9	319	32	S
1997	11	6	12	39	48.69	44.418	6.5	-5	3.6	Bn15	oui	177	61	163	275	75	30	43	10	139	31	Ba
1998	5	6	12	2	26.22	44.161	6.09	-4	3.2	Bn17	oui	166	80	142	264	53	13	221	18	118	34	Ba

Mécanismes au foyer des séismes situés dans le socle.

Quatre séismes sont déterminés par plusieurs auteurs.

Trente deux sur trente sept sont compatibles entre eux (86%).

Ba:Barroux et al., 2001

B1:Béthoux et al., 1988

D:Deverchère et al., 1991

F1:Fréchet, 1978

F:Fréchet et Pavoni, 1979

M:Maddedu et al., 1996

N:Nicolas et al., 1990

S:Sue et al., 1999

Annexe 2																						
an	mois	jour	heure	minute	seconde	latitude	longitude	profondeur	magnitude	Localisation	Compatible dans la zone	azA	dipA	rakeA	azB	dipB	rakeB	azP	dipP	azT	dipT	REF
1971	6	6	21	59	11	44.64	6.75	-3	4.2	M7	oui	84			161			31		124		N
1972	4	3	22	19	16	44.41	7	-3	3.5	M8	oui	124			38			177		73		F1
1972	6	19	4	9	51	44.36	6.33	-2	3.8	M11	NON	196			124			70		163		F1
1976	6	7	0	8	48	44.66	6.68	-3	3.3	M14	NON	19			109			63		333		F1
1990	11	9	10	59	2.6	43.93	6.6	-2	3.3	44	NON	152	58	55	25	46	133	266	7	8	60	M
1996	10	7	12	26	27.9	43.83	5.78	-3	2.9	65	NON	94	67	169	188	80	23	319	9	53	23	V
1987	5	9	6	0	16.74	44.2	6.84	-1	3.4	Bn2	NON	316	43	133	84	60	57	197	10	304	60	Ba
1987	6	28	2	12	52.84	44.167	6.14	-1	3.7	Bn3	oui	125	53	118	264	45	58	194	4	95	68	Ba
1992	7	31	20	14	27.46	44.47	6.39	-1	3	Bn9	NON	35	39	-129	169	60	-63	33	64	278	12	Ba
1993	4	14	10	32	6.79	44.23	6.23	-3	3.2	Bn10	NON	134	34	79	327	57	97	52	11	260	77	Ba
1994	11	24	21	17	35.41	43.82	6.44	-2	3.5	Bn11	oui	77	49	77	276	43	105	176	3	285	80	Ba
1997	10	3	15	3	35.44	44.33	6.44	-1	3.8	Bn13	NON	37	52	-153	144	69	-41	7	43	267	11	Ba
Mécanismes au foyer des séismes situés dans la couverture.								Ba:Barroux et al., 2001				B1:Béthoux et al., 1988					D:Deverchère et al., 1991					
F1:Fréchet, 1978					M:Maddedu et al., 1996			N:Nicolas et al., 1990				V:Volant et al., 2000										

Ce document est soumis au droit d'auteur. Toute reproduction totale ou partielle par quelque procédé que ce soit, sans autorisation expresse, est interdite.